

经颅直流电刺激联合康复治疗 对膝骨关节炎患者的影响

张天姿^{1,2}, 李杰¹, 邢军^{1*}, 赵保礼¹, 杨畅然^{1,2}, 赵雨欣^{1,2}, 王会敏^{1,2}, 董佳旺^{1,2}

1 河北医科大学第一医院, 河北 石家庄 050023;

2 河北医科大学研究生学院, 河北 石家庄 050017

* 通信作者: 邢军, E-mail: 56901734@hebm.edu.cn

收稿日期: 2025-02-04; 接受日期: 2025-08-31

基金项目: 河北省科技厅重点研发计划卫生健康创新专项(2137778D)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.06010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 目的 观察经颅直流电刺激(tDCS)联合康复治疗对膝骨关节炎(KOA)患者的影响。**方法** 选择2023年11月—2024年7月河北医科大学第一医院康复科门诊治疗的KOA患者44例,采用在线随机数字表法分为对照组和试验组,每组22例,并进行分配隐藏。2组均接受常规康复治疗,包括微波治疗(20 min/次,3次/周,持续2周)和运动训练(30 min/次,每10 min休息3 min,3次/周,共持续3周)。对照组在常规康复治疗的基础上接受经颅直流电假刺激,电极部位选择头部相关运动反应区,阳极为患膝对侧初级运动皮层M1区,阴极为患膝同侧的眶上区SO区,无实际刺激电流。试验组在常规康复治疗的基础上接受经颅直流电真刺激,试验组电极放置同对照组,刺激电流2 mA,20 min/次,3次/周,持续治疗12次。分别于治疗开始前1 d和治疗完成后1 d对患者进行以下指标评估。采用全身三维步态与运动分析系统评价患者步行功能(步长、步幅、步速、步频、支撑相百分比);采用三维步态与运动分析系统评价患者关节运动学参数(髌/膝/踝关节的矢状面/水平面/额状面活动角度和范围);采用膝关节损伤和骨关节炎评分(KOOS)评价膝关节的功能状态(疼痛、症状、日常生活活动能力、运动和娱乐功能以及膝关节相关生活质量);采用起立-行走计时测试(TUGT)评价患者功能性移动能力;比较2组不良反应。**结果** ① 步行功能:与治疗前比较,2组治疗后步长、步速、步幅均明显升高($P<0.05$),支撑相百分比明显降低($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后步长、步速均明显更高($P<0.05$)。② 髌、膝、踝关节活动度:与治疗前比较,2组治疗后髌、膝关节屈曲角度、矢状面活动范围均明显升高($P<0.05$);踝关节内收角度、髌关节外展角度均明显降低($P<0.05$);踝关节内翻角度明显降低($P<0.05$)。与对照组比较,试验组髌关节屈曲角度、矢状面活动范围均明显更高($P<0.05$);膝关节矢状面活动范围均明显更高($P<0.05$)。③ KOOS评分:与治疗前比较,2组治疗后症状、疼痛、日常活动、运动和娱乐功能、膝关节相关生活质量评分和KOOS总分均明显提高($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后症状、疼痛、日常活动、运动和娱乐功能、膝关节相关生活质量评分和KOOS总分均明显更高($P<0.05$)。④ TUGT:与治疗前比较,2组治疗后TUGT均明显缩短($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后TUGT明显更短($P<0.05$)。⑤ 安全性:治疗期间,2组均未报告皮肤刺激、运动训练相关的不良反应。**结论** 经颅直流电刺激联合康复治疗可有效改善膝骨关节炎患者步行功能、髌关节屈曲角度和髌、膝关节矢状面活动范围、膝关节功能状态、功能性移动能力,安全性较高,值得临床推广应用。

关键词 膝骨关节炎;经颅直流电刺激;康复治疗;步态功能;运动功能;膝关节功能

引用格式:张天姿,李杰,邢军,等.经颅直流电刺激联合康复治疗对膝骨关节炎患者的影响[J].康复学报,2025,35(6):619-626.

ZHANG T Z, LI J, XING J, et al. Effects of transcranial direct current stimulation combined with rehabilitation therapy on patients with knee osteoarthritis [J]. Rehabil Med, 2025, 35(6): 619-626.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.06010

©《康复学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

膝骨性关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是一种常见的慢性退变性关节疾病,随着生活方式的改变以及人口老龄化的加速,KOA全球发病率呈逐年上升趋势。预计2050年发病率将达74.9%^[1],这将给患者、家庭以及社会带来沉重经济负担。KOA的临床表现主要为关节疼痛、僵硬以及功能受限,进而导致步态异常、步速减慢、步行距离缩短^[2],甚至因长期慢性疼痛出现焦虑、抑郁等心理疾病^[3]。目前针对KOA的临床治疗分为手术治疗(如终末期患者接受关节置换术)以及非手术治疗(包括口服药物、局部注射以及物理治疗等)。非手术治疗中,以运动疗法、物理因子治疗和健康教育为核心的康复治疗,因其无创性、安全性及循证有效性,被国际指南推荐为早中期KOA的一线基础疗法^[4]。但是,常规康复疗效存在个体差异且易达平台期,现阶段尚缺乏统一的最佳治疗方案。因此,探索有效增强常规康复疗效的无创联合疗法是临床研究的迫切需求。

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)是新兴的非侵入性脑刺激技术,在神经康复领域已取得显著效果,常应用于缓解慢性疼痛,包括慢性下腰痛^[5]和纤维肌痛^[6]等。本研究采用tDCS联合常规康复治疗膝骨关节炎患者,并采用高精度的三维步态分析系统量化评估,以期为临床治疗提供依据。

1 临床资料

1.1 病例选择标准

1.1.1 诊断标准 符合《中国骨关节炎诊疗指南(2021年版)》^[7]关于KOA的诊断标准。

1.1.2 纳入标准 ①以慢性疼痛为主要临床症状,疼痛视觉模拟评分(Visual Analogue Scale, VAS)≥

3分;②年龄40~80岁,性别不限;③骨关节炎严重程度Kellgren-Lawrence(K-L)分级I~Ⅲ级,X线提示关节内无较大游离体者;④入组前1周内未进行过任何相关治疗或其他临床试验;⑤患者知情同意,能配合完成治疗,自愿签署知情同意书。

1.1.3 排除标准 ①膝关节存在严重肿胀,难以完成评定和运动训练;②合并严重心、脑、肝、肾和造血系统疾病及精神疾病;③合并膝关节感染、开放性伤口、肿瘤、结核及相关风湿免疫系统疾病;④存在膝关节手术史或体内金属内置物;⑤刺激部位皮肤存在破损或对电流敏感。

1.1.4 中止与脱落标准 ①未按预定时间或疗程接受治疗,以致无法判断疗效;②发生严重毒副作用和并发症,需采用其他治疗方法,无法继续疗程;③研究期间使用了影响研究结果的其他药物或治疗;④受试者主动要求退出研究。

1.2 一般资料

选择2023年11月—2024年7月河北医科大学第一医院康复科门诊收治的44例KOA患者作为研究对象,采用在线随机数字表(<https://tools.medsci.cn/rand>)分为对照组和试验组,每组22例,随机分配序列被置于顺序编码、密封、不透光信封中进行分配隐藏,研究人员确定受试对象后,按序拆封并将受试对象分配至相应组别,受试者不知晓分组情况。2组性别、年龄、病程、体质量指数(body mass index, BMI)、疾病部位和K-L分级等一般资料比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。见表1。本研究方案通过河北医科大学第一医院医学伦理委员会审核批准(审批号:202300019-02),且在中国临床试验注册中心注册(注册号:ChiCTR2400089958)。

表1 2组一般资料比较

Table 1 Comparison of general data between two groups

组别	例数	性别		年龄/ $(\bar{x}\pm s, \text{岁})$	病程/ $([M(P_{25}, P_{75})], \text{月})$	BMI/ $(\bar{x}\pm s, \text{kg/m}^2)$	疾病部位		K-L分级		
		男	女				左侧	右侧	I级	II级	III级
对照组	22	6	16	61.45±7.61	13.50(6.00,24.00)	26.12±1.46	13	9	4	10	8
试验组	22	8	14	57.86±6.56	11.00(6.00,18.00)	24.98±3.23	8	14	4	13	5

2 方法

2.1 治疗方法

2.1.1 常规康复治疗 2组均接受常规康复治疗,包括微波治疗和运动训练。

2.1.1.1 微波治疗 治疗前2周使用微波治疗仪

(江苏诺万医疗设备有限公司,型号:KJ-6200C型)进行膝关节治疗,20 min/次,3次/周,功率20 W,以患者感到微热为宜,持续治疗2周。

2.1.1.2 运动训练 在第1周微波治疗结束后接受运动训练,30 min/次,每10 min休息3 min,3次/周,

共持续3周。①髌膝踝联动性练习:弓箭步下蹲、徒手深蹲和靠墙深蹲动作,重塑下蹲模式,调整力线。②股四头肌训练:弹力带抗阻坐位伸膝。③腘绳肌训练:俯卧位屈膝拉动弹力带。④拉伸:治疗师指导下使用泡沫轴进行充分放松。

2.1.2 对照组 在常规康复治疗的基础上接受经颅直流电假刺激。

在患者运动训练过程中使用可穿戴式经颅直流电刺激仪(四川嘉智成铭医疗设备有限公司,型号:IS200)同步实施电刺激。选择1对3 cm×5 cm电极片,套以棉布衬垫,用0.9% NaCl溶液浸湿,电极部位选择在头部相关运动反应区,阳极为患膝对侧初级运动皮层M1区,阴极为患膝同侧的眶上区SO区。刺激电流在30 s内从0 mA上升到2 mA,无实际电流刺激,再立即于30 s内从2 mA下降到0 mA。20 min/次,3次/周,持续治疗12次。

2.1.3 试验组 在常规康复治疗的基础上接受经颅直流电真刺激。试验组电极放置和刺激电流同对照组,参考文献[8-10]选择刺激参数和刺激时间。

治疗过程中,患者被询问是否感觉到电流刺激,2组患者回答均为无,表明盲法实施成功。

2.2 观察指标

由同一治疗师在治疗开始前1 d和治疗完成后1 d对患者进行以下指标评估。

2.2.1 步行功能 采用全身三维步态与运动分析系统(江苏德长医疗科技有限公司,型号:RealGait 2.0)评价患者步行功能。主要包括步长、步幅、步速、步频、支撑相百分比。每位患者至少测试3次,取其平均值。测试开始前,向患者介绍整个评定流程并进行演示,让患者进行适应性行走,步速、步幅等不做规定,嘱其放松,按照平时自然步态行走;测试开始前要求患者按照指令进行下蹲、直立等动作进行校准^[11]。步长或步幅缩短和步速降低提示移动能力下降;步频和支撑相异常提示疼痛或平衡问题。

2.2.2 关节运动学参数 采用三维步态与运动分析系统评价患者关节运动学参数。收集患者步行过程中髌/膝/踝关节的矢状面/水平面/额状面活动角度。以解剖学中中立位为0°,当关节活动方向与系统参考方向一致时记为正(+),相反时记为负(-),正负号仅表示方向。关节的三维活动角度综合反映步态控制能力:矢状面反映关节活动范围;额状面反映稳定性;水平面反映协调性;整体可评

估运动功能障碍及代偿策略。

2.2.3 膝关节功能 采用膝关节损伤和骨关节炎评分(Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score, KOOS)评价膝关节的功能状态。主要包括疼痛、症状、日常活动、运动和娱乐功能以及膝关节相关生活质量5个维度,每个维度评分0~100分。0分代表最差状态,100分代表最好状态。

2.2.4 功能性移动能力 采用起立-行走计时测试(Timed Up and Go Test, TUGT)^[12]评价患者功能性移动能力。要求患者从有扶手的椅子上站起,向前行走3 m,然后转身,再走回椅子并坐下。整个过程中,患者要尽可能快地完成这些动作,并且保证安全。计时方式:从患者开始站起开始计时,一直到其完全坐下结束,记录所用时间。每个患者测量3次,2次测试时间间隔至少10 min,获取有效数据计算平均值。TUGT时间越长,表明膝关节炎患者功能性移动能力越差(平衡弱、步态慢、跌倒风险高)。

2.2.5 安全性评估 在治疗过程中,密切观察并记录2组患者是否出现不良反应,包括tDCS治疗时的皮肤刺激情况(如瘙痒、灼痛、红斑等)以及运动训练相关的不适(如下肢肌肉酸痛、关节疼痛加重、疲劳等),并对严重程度进行评估。

2.3 统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件进行数据分析。计量资料服从正态分布以($\bar{x}\pm s$)表示,组间比较采用两独立样本 t 检验,组内比较采用配对样本 t 检验;计量资料不服从正态分布以 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示,组间比较采用两样本秩和检验,组内比较采用配对样本Wilcoxon符号秩检验。 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

3 结果

3.1 2组治疗前后步行功能比较

与治疗前比较,2组治疗后步长、步速、步幅均明显升高($P<0.05$),支撑相百分比明显降低($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后步长、步速均明显更高($P<0.05$)。见表2。

3.2 2组治疗前后髌、膝、踝关节活动度比较

3.2.1 2组治疗前后髌关节活动度比较 与治疗前比较,2组治疗后髌关节屈曲角度、矢状面活动范围均明显升高($P<0.05$),外展角度明显降低($P<0.05$)。与对照组比较,试验组髌关节屈曲角度、矢状面活动范围均明显更高($P<0.05$)。见表3。

表2 2组治疗前后步行功能比较($\bar{x}\pm s$)

Table 2 Comparison of walking function between two groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	步长/m		步速/(m/s)		支撑相百分比/%	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	22	0.50±0.08	0.54±0.07 ¹⁾	0.93±0.13	1.01±0.13 ¹⁾	64.46±3.18	62.31±2.03 ¹⁾
试验组	22	0.49±0.08	0.57±0.05 ¹⁾²⁾	0.97±0.15	1.11±0.13 ¹⁾²⁾	63.86±3.20	61.90±2.22 ¹⁾

组别	例数	步幅/m		步频/(步/min)	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	22	0.99±0.10	1.07±0.10 ¹⁾	120.61±8.84	125.44±11.57
试验组	22	0.99±0.11	1.07±0.16 ¹⁾	125.50±7.87	130.18±13.42

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$ 。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

表3 2组治疗前后髋关节活动度比较[($\bar{x}\pm s$)/ $M(P_{25}, P_{75})$]

Table 3 Comparison of motion range of hip joint between two groups before and after treatment [($\bar{x}\pm s$)/ $M(P_{25}, P_{75})$]

组别	例数	时间	屈曲角度	伸展角度	内收角度	外展角度	内旋角度
对照组	22	治疗前	36.21±4.53	17.35±8.62	14.00±4.94	3.47(2.21, 5.44)	11.45(9.52, 17.80)
		治疗后	38.49±4.85 ¹⁾	19.13±7.14	13.29±4.58	2.11(0.19, 4.06) ¹⁾	10.67(5.35, 14.80)
试验组	22	治疗前	36.73±3.84	16.26±4.95	12.82±4.03	2.84(1.17, 5.35)	11.58(6.05, 15.37)
		治疗后	41.27±3.77 ¹⁾²⁾	18.26±4.85	13.40±3.07	2.70(-0.90, 3.81) ¹⁾	11.85(7.62, 14.52)

组别	例数	时间	外旋角度	矢状面活动范围	水平面活动范围	额状面活动范围
对照组	22	治疗前	13.30(10.33, 16.98)	49.74±3.67	18.13±3.90	13.36±4.29
		治疗后	15.37(10.81, 18.26)	51.32±3.33 ¹⁾	18.96±3.78	12.67±3.83
试验组	22	治疗前	12.80(7.51, 17.74)	50.73±6.57	16.45±4.29	12.71±6.29
		治疗后	11.13(9.10, 16.73)	53.55±3.87 ¹⁾²⁾	17.75±4.05	12.47±3.53

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$ 。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

3.2.2 2组治疗前后膝关节活动度比较 与治疗前 均明显升高($P<0.05$)。与对照组比较,试验组膝关
节矢状面活动范围均明显更高($P<0.05$)。见表4。

表4 2组治疗前后膝关节活动度比较[($\bar{x}\pm s$)/ $M(P_{25}, P_{75})$]

Table 4 Comparison of motion range of knee joint between two groups before and after treatment [($\bar{x}\pm s$)/ $M(P_{25}, P_{75})$]

组别	例数	时间	屈曲角度	伸展角度	内旋角度	外旋角度	内收角度
对照组	22	治疗前	51.68±9.22	3.71(-0.02, 6.48)	3.65(2.20, 7.20)	17.51±6.93	6.63(4.67, 11.20)
		治疗后	55.08±7.26 ¹⁾	3.27(-2.3, 7.16)	3.42(-0.96, 5.34)	18.81±7.28	9.93(6.66, 11.07)
试验组	22	治疗前	51.45±8.90	3.40(1.05, 7.09)	3.53(0.46, 8.58)	15.44±5.01	6.32(3.45, 13.38)
		治疗后	56.91±4.86 ¹⁾	1.37(0.25, 6.52)	3.04(-0.79, 6.30)	17.25±4.92	6.42(4.47, 10.92)

组别	例数	时间	外展角度	矢状面活动范围	水平面活动范围	额状面活动范围
对照组	22	治疗前	8.86(6.91, 11.81)	49.17±5.39	22.64±6.12	11.16(9.43, 16.21)
		治疗后	10.03(6.11, 15.06)	52.56±5.28 ¹⁾	23.09±8.93	16.92(10.45, 22.04)
试验组	22	治疗前	10.04(8.29, 19.02)	49.75±7.64	20.19±5.97	11.13(7.84, 26.88)
		治疗后	9.19(7.08, 13.53)	55.95±5.39 ¹⁾²⁾	20.43±4.97	13.01(10.06, 16.53)

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$ 。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

3.2.3 2组治疗前后踝关节活动度比较 与治疗前 踝关节内翻角度明显降低,差异均具有统计学意义
比较,2组治疗后踝关节内收角度明显降低,试验组 ($P<0.05$)。见表5。

表5 2组治疗前后踝关节活动度比较 $[(\bar{x}\pm s)/M(P_{25},P_{75})]$
 Table 5 Comparison of ankle joint range of motion between two groups before and after treatment $[(\bar{x}\pm s)/M(P_{25},P_{75})]$

组别	例数	时间	背屈角度	跖屈角度	内收角度	外展角度
对照组	22	治疗前	11.38(9.29,15.45)	36.45±13.33	10.96(5.98,14.02)	15.69(9.26,18.98)
		治疗后	13.06(9.05,16.59)	37.89±7.51	8.13(6.11,10.98) ¹⁾	14.53(9.29,19.91)
试验组	22	治疗前	11.58(9.96,16.49)	33.50±10.67	11.55(7.46,15.97)	13.84(7.19,17.22)
		治疗后	9.70(8.63,14.74)	38.45±11.38	10.66(4.32,12.46) ¹⁾	14.27(9.00,27.69)

组别	例数	时间	内翻角度	外翻角度	矢状面活动范围	水平面活动范围	额状面活动范围
对照组	22	治疗前	11.51(7.02,17.77)	14.68(10.90,18.86)	39.19±7.71	18.66±6.75	22.94±9.49
		治疗后	11.83(8.88,14.85)	14.14(12.30,21.13)	40.99±10.35	19.16±8.48	20.68±8.61
试验组	22	治疗前	11.96(8.26,17.70)	14.31(12.62,16.47)	39.44±7.95	17.34±5.92	25.27±12.10
		治疗后	9.65(4.08,15.05) ¹⁾	16.29(12.62,24.27)	41.04±7.64	18.17±4.90	22.20±10.81

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$ 。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$.

3.3 2组治疗前后KOOS评分比较

与治疗前比较,2组治疗后症状、疼痛、日常活动、运动和娱乐功能、膝关节相关生活质量评分和KOOS总分均明显提高($P<0.05$)。与对照组比较,

试验组治疗后症状、疼痛、日常活动、运动和娱乐功能、膝关节相关生活质量评分和KOOS总分均明显更高($P<0.05$)。见表6。

表6 2组治疗前后KOOS评分比较 $[M(P_{25},P_{75})]$
 Table 6 Comparison of KOOS assessment scale before and after treatment between the two groups $[M(P_{25},P_{75})]$ Scores

组别	例数	时间	症状	疼痛	日常活动
对照组	22	治疗前	69.650(60.700,82.100)	75.000(66.000,80.600)	86.050(70.625,92.975)
		治疗后	78.600(75.000,89.300) ¹⁾	84.700(77.800,89.600) ¹⁾	91.200(77.925,94.100) ¹⁾
试验组	22	治疗前	75.000(67.900,82.100)	75.000(61.825,81.275)	85.300(75.750,91.550)
		治疗后	92.900(83.925,96.400) ¹⁾²⁾	94.400(91.000,97.200) ¹⁾²⁾	97.100(94.100,100.000) ¹⁾²⁾

组别	例数	时间	运动和娱乐功能	膝关节相关生活质量	KOOS总分
对照组	22	治疗前	35.000(13.750,80.000)	43.800(29.725,68.800)	306.700(241.475,401.200)
		治疗后	42.500(33.750,71.250) ¹⁾	53.150(35.950,65.625) ¹⁾	359.050(298.050,400.000) ¹⁾
试验组	22	治疗前	45.000(20.000,61.250)	31.300(23.450,57.850)	307.350(262.300,360.075)
		治疗后	80.000(68.750,86.250) ¹⁾²⁾	71.900(62.500,76.575) ¹⁾²⁾	426.650(415.075,448.900) ¹⁾²⁾

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$ 。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

3.4 2组治疗前后TUGT比较

与治疗前比较,2组治疗后TUGT均明显缩短($P<0.05$)。与对照组比较,试验组治疗后TUGT明显更短($P<0.05$)。见表7。

3.5 2组治疗安全性比较

治疗期间,2组均未报告tDCS治疗时的皮肤刺激、运动训练相关的不适以及其他与治疗相关的异常情况。

表7 2组治疗前后TUGT比较 $(\bar{x}\pm s)$

Table 7 Comparison of TUGT between two groups before and after treatment $(\bar{x}\pm s)$

组别	例数	治疗前	治疗后
对照组	22	10.57±2.18	9.69±1.47 ¹⁾
试验组	22	10.23±1.82	8.38±0.89 ¹⁾²⁾

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$ 。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

4 讨论

4.1 tDCS联合康复治疗可改善KOA患者步行功能

本研究结果显示,与对照组比较,试验组治疗后步长、步速均明显更高,这提示tDCS联合康复治疗能够有效改善KOA患者步行功能。这可能与以下因素有关:①康复治疗可改善KOA患者疼痛和膝关节稳定性。KOA患者早期疼痛时常采用“减痛步态”或“逃避疼痛步态”,主要表现为步速减慢、步长缩短、步频减小^[13],步态周期延长,双支撑时间增加等。本研究康复治疗可明显减轻KOA患者疼痛、提高膝关节稳定性、促进软骨修复、缓解退变、增强本体感觉、减少关节异常应力及损伤等,从而有效缓解步行时疼痛、改善步长及步速^[14-15]。这与ZHU等^[15]研究结果相似。②tDCS可增强皮层兴奋性。tDCS通过阳极刺激作用于初级运动皮层M1区,可增强皮层兴奋性,促进内源性镇痛物质(如内啡肽)释放,抑制疼痛传导通路(如丘脑-皮质投射)。有研究显示,KOA患者膝关节运动时,对侧M1区激活明显减弱,且激活水平与疼痛程度(VAS评分)、功能障碍(WOMAC评分)呈负相关^[16]。通过tDCS提高KOA患者对侧M1区兴奋性,恢复下行疼痛抑制功能,提高痛阈和条件性疼痛调制能力,可改善KOA患者患腿支撑程度与时长,提高步长和步速。③tDCS联合康复治疗可协同增强疼痛控制效果。tDCS阳极刺激M1区,通过中枢性疼痛调节机制调节疼痛相关脑区(如前扣带回、岛叶)的兴奋性,抑制疼痛信号传导^[17]。康复训练通过重复运动输入重塑中枢痛觉敏化,提高痛阈,减少“疼痛-活动受限”恶性循环;增加关节稳定性,减少应力性疼痛,二者协同增益可减轻KOA患者膝关节疼痛。此外,两者联合可提高M1区兴奋性,促进运动学习与肌肉控制,优化神经肌肉协调,强化康复训练对下肢肌肉的激活效率,改善疼痛症状和步行功能。

4.2 tDCS联合康复治疗可改善KOA患者髌关节屈曲角度及髌/膝关节矢状面活动范围

本研究结果显示,与对照组比较,试验组治疗后髌关节屈曲角度及髌/膝关节矢状面活动范围均明显更高,这提示tDCS联合康复治疗可改善KOA患者髌关节屈曲角度及髌/膝关节矢状面活动范围。可能与以下原因有关:①tDCS可有效改善KOA患者促炎因子释放。KOA患者在步态周期中(尤其是摆动期)膝关节屈曲角度明显降低^[18],膝关节矢状面活动范围也较健康人群减少且随病情加重进行性下降。这可能与KOA患者关节周围软组织炎

症有关。tDCS可下调促炎因子[如白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)],上调抗炎因子(如IL-10),减轻关节周围软组织炎症,联合康复训练可有效激活疼痛下行抑制通路,打破疼痛-活动受限循环。KOA患者因疼痛会本能采用保护性步态,即行走时膝关节处于伸直状态(初始触地期膝伸展角度增大),降低膝内收力矩。这种代偿迫使髌关节减少屈曲幅度,当疼痛减轻,代偿也随之减轻。②tDCS可提高运动神经元兴奋性,改善肌肉力量和协调性。tDCS作用于初级运动皮层M1区,通过降低 γ -氨基丁酸能抑制,增强皮层神经元去极化,提升运动神经元兴奋性和运动皮层对下肢肌肉的调控,改善肌肉力量和协调性。③tDCS联合康复训练可协同提高皮质脊髓束兴奋性。康复训练直接作用于关节周围肌肉,康复训练联合tDCS可增加皮质脊髓束兴奋性,改善下肢肌肉募集效率,进一步扩大关节活动范围。tDCS通过调节感觉运动整合,优化步态中髌-膝协同屈曲,持续优化运动皮层-基底节-小脑环路,可进一步巩固运动学习效果。tDCS联合康复治疗可使KOA患者膝关节活动范围得到改善,减轻膝关节屈曲痉挛以及疼痛,并缓解髌关节代偿性异常,提高髌关节屈曲角度以及矢状面活动范围。这与QUEEN等^[19]研究结果一致。但2组膝关节屈曲角度差异无统计学意义,可能与KOA导致的关节增生及畸形发展有关。

4.3 tDCS联合康复治疗可改善KOA患者膝关节功能状态

本研究结果显示,与对照组比较,试验组治疗后症状、疼痛、日常活动、运动和娱乐功能、膝关节相关生活质量评分、KOOS总分均明显更高。这提示tDCS联合康复治疗能够有效改善KOA患者膝关节功能。这可能与以下原因有关:①tDCS可改善KOA患者日常活动、运动和娱乐功能。tDCS可降低KOA患者促炎细胞因子水平,减轻关节肿胀和晨僵等症状,改善膝关节相关生活质量;增强下行疼痛抑制通路(如内源性阿片系统),增加体感皮层氧合血红蛋白浓度,诱导脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)表达促进突触可塑性,形成“疼痛记忆消退”,改善疼痛相关的神经可塑性,减轻疼痛及其相关的焦虑和抑郁,从而提高日常活动与运动和娱乐功能。这与SUCHTING等^[20]研究结果相似。②康复训练可改善KOA患者膝关节相关生活质量。康复训练通过炎症-神经调控(缓解疼痛)、肌骨功能重建(改善日常生活活动能力)、步态行为干预(提升膝关节相关生活质量)

三重机制改善膝关节功能;此外,康复训练还可改善关节活动度及肌肉力量,从而提高日常生活活动能力和膝关节相关生活质量。③ tDCS联合康复治疗可协同增强肌力,提高康复效率。tDCS联合康复训练可发挥中枢联合局部抗炎作用,提高疼痛阈值,有效减轻疼痛。tDCS通过神经肌肉控制优化策略对KOA患者进行肌力增强训练,提高康复效率,增强日常生活活动能力。此外,两者联合通过运动-情绪环路激活与疼痛-情绪交互作用进行疼痛认知重塑,tDCS阳极刺激M1区可增强背外侧前额叶的认知控制功能、抑制疼痛信号,减轻疼痛相关的负性情绪(如抑郁、焦虑),减少任务诱发的挫折感,增强康复信心,从而改善日常活动、运动和娱乐功能和膝关节相关生活质量。

4.4 tDCS联合康复治疗可改善KOA患者功能性移动能力

本研究结果显示,与对照组比较,试验组治疗后TUGT明显更低,这提示tDCS联合康复治疗可改善KOA患者功能性移动能力。可能与以下因素相关:① 康复训练可提高KOA患者膝关节稳定性。康复训练可增强膝关节周围肌力,提高膝关节稳定性,减少起身阶段耗时。此外,还可增强关节本体感觉传入,精细化关节位置觉,优化动态平衡控制,产生步态周期再分配,改善功能性移动能力。② tDCS联合康复训练可促进KOA患者疼痛与功能同步改善,在神经兴奋窗口期优化运动学习,同时还可以减少血清促炎因子保护关节软骨,减轻滑膜炎性浸润^[19]。两者联合治疗可通过中枢镇痛-外周抗炎-运动控制优化的三重机制共同改善患者的功能性移动能力。

5 小结

tDCS联合康复治疗可有效改善膝骨关节炎患者步行功能、屈膝活动和髌/膝关节矢状面活动范围、膝关节功能状态、功能性移动能力,安全性较高,值得临床推广应用。但本研究仍存在一定局限性,如仅纳入单侧KOA患者、样本量较小且未进行随访、未探究不同tDCS治疗参数对治疗效果的影响等。未来研究还需要纳入双侧KOA患者,并对比单侧与双侧KOA患者疗效差异,扩大样本量,并加强出院后随访,同时探究不同tDCS参数对治疗效果的影响,以期tDCS联合康复治疗改善早中期KOA患者步态和运动功能提供更多循证依据。

参考文献

[1] ZHU S Y, QU W C, HE C Q. Evaluation and management of knee osteoarthritis [J]. *J Evid Based Med*, 2024, 17(3): 675-687.

- [2] CHITLANGE N M, PATIL D S, SHARATH H V, et al. Impact of xsens technology on analysis of gait deviation in pre- and post-surgical total knee arthroplasty patient [J]. *Cureus*, 2024, 16(8): e67539.
- [3] YANG W H, MA G Y, LI J C, et al. Anxiety and depression as potential risk factors for limited pain management in patients with elderly knee osteoarthritis: a cross-lagged study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 995.
- [4] FERNANDES L, HAGEN K B, BIJLSMA J W J, et al. EULAR recommendations for the non-pharmacological core management of hip and knee osteoarthritis [J]. *Ann Rheum Dis*, 2013, 72(7): 1125-1135.
- [5] ALCON C, ZOCH C, LUETKENHAUS R, et al. Combined transcranial direct current stimulation and pain neuroscience education for chronic low back pain: a randomized controlled trial [J]. *Pain Med*, 2025, 26(2): 90-97.
- [6] YANG C L, QU Y, HUANG J P, et al. Efficacy and safety of transcranial direct current stimulation in the treatment of fibromyalgia: a systematic review and meta-analysis [J]. *Neurophysiol Clin*, 2024, 54(1): 102944.
- [7] 中华医学会骨科学分会关节外科学组, 中国医师协会骨科医师分会骨关节炎学组, 国家老年疾病临床医学研究中心(湘雅医院), 等. 中国骨关节炎诊疗指南(2021年版)[J]. *中华骨科杂志*, 2021, 41(18): 1291-1314. The Joint Surgery Branch of the Chinese Orthopaedic Association, The Subspecialty Group of Osteoarthritis of Chinese Association of Orthopaedic Surgeons, The National Clinical Research Center for Geriatric Disorders (Xiangya Hospital), et al. Guidelines for diagnosis and treatment of osteoarthritis in China (2021 edition) [J]. *Chin J Orthop*, 2021, 41(18): 1291-1314.
- [8] LEFAUCHEUR J P, ANTAL A, AYACHE S S, et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of transcranial direct current stimulation (tDCS) [J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128(1): 56-92.
- [9] SAJADI S, KARIMI M, FOROGH B, et al. Randomized clinical trial comparing of transcranial direct current stimulation (tDCS) and transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) in knee osteoarthritis [J]. *Neurophysiol Clin*, 2020, 50(5): 367-374.
- [10] MARTORELLA G, MATHIS K, MIAO H Y, et al. Self-administered transcranial direct current stimulation for pain in older adults with knee osteoarthritis: a randomized controlled study [J]. *Brain Stimul*, 2022, 15(4): 902-909.
- [11] 邢军, 王宣, 王亚辉, 等. 微波联合体外冲击波对早中期膝骨关节炎患者步态及运动功能的影响[J]. *现代中西医结合杂志*, 2025, 34(4): 473-478. XING J, WANG X, WANG Y H, et al. Effect of microwave combined with extracorporeal shock wave on gait and motor function of patients with early to mid-stage knee osteoarthritis [J]. *Mod J Integr Tradit Chin West Med*, 2025, 34(4): 473-478.
- [12] PODSIADLO D, RICHARDSON S. The Timed "Up & Go": a test of basic functional mobility for frail elderly persons [J]. *J Am Geriatr Soc*, 1991, 39(2): 142-148.
- [13] 王海波. 膝骨关节炎患者步态特征分析及其在膝关节功能评价中的应用[D]. 西安: 西安医学院, 2025: 3-5. WANG H B. Gait analysis of patients with knee osteoarthritis and

- its application in knee function evaluation [D]. Xi'an:Xi'an Medical University, 2025: 3-5.
- [14] GILL N, ROBERTS A, O'LEARY T J, et al. Role of sex and stature on the biomechanics of normal and loaded walking: implications for injury risk in the military [J]. *BMJ Mil Health*, 2023, 169(1): 89-93.
- [15] ZHU S Y, WANG Z, LIANG Q, et al. Chinese guidelines for the rehabilitation treatment of knee osteoarthritis: an CSPMR evidence-based practice guideline [J]. *J Evid Based Med*, 2023, 16(3): 376-393.
- [16] YANG K, DING Y W, CHU L X, et al. Altered activation patterns of the sensory-motor cortex in patients with knee osteoarthritis during knee isokinetic movement at different speeds [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1444731.
- [17] MORYA E, MONTE-SILVA K, BIKSON M, et al. Beyond the target area: an integrative view of tDCS-induced motor cortex modulation in patients and athletes [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 141.
- [18] FUKAYA T, MUTSUZAKI H, NAKANO W, et al. Smoothness of the knee joint movement during the stance phase in patients with severe knee osteoarthritis [J]. *Asia Pac J Phys Med Arthrosc Rehabil Technol*, 2018, 14: 1-5.
- [19] QUEEN R M, CAMPBELL J C, SCHMITT D. Gait analysis reveals that total hip arthroplasty increases power production in the hip during level walking and stair climbing [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2019, 477(8): 1839-1847.
- [20] SUCHTING R, COLPO G D, ROCHA N P, et al. The effect of transcranial direct current stimulation on inflammation in older adults with knee osteoarthritis: a Bayesian residual change analysis [J]. *Biol Res Nurs*, 2020, 22(1): 57-63.

Effects of Transcranial Direct Current Stimulation Combined with Rehabilitation Therapy on Patients with Knee Osteoarthritis

ZHANG Tianzi^{1,2}, LI Jie¹, XING Jun^{*}, ZHAO Baoli¹, YANG Changran^{1,2}, ZHAO Yuxin^{1,2}, WANG Huimin^{1,2}, DONG Jiawang^{1,2}

¹ First Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang, Hebei 050023, China;

² Graduate School of Hebei Medical University, Shijiazhuang, Hebei 050017, China

*Correspondence: Xing Jun, E-mail: 56901734@hebm.u.edu.cn

ABSTRACT Objective To observe the clinical efficacy of transcranial direct current stimulation (tDCS) combined with rehabilitation therapy on patients with knee osteoarthritis (KOA). **Methods** A total of 44 KOA patients who were treated in the outpatient department of Rehabilitation of the First Hospital of Hebei Medical University from November 2023 to July 2024 were enrolled and randomly divided into control group and experimental group, with 22 cases in each group. Allocation concealment was performed. Both groups received conventional rehabilitation therapy, which included microwave therapy (20 minutes a time, three times per week for two consecutive weeks) and exercise training (30 minutes a time, with a three-minute rest every 10 minutes, three times a week for three consecutive weeks). The control group received sham transcranial direct current stimulation in addition to the conventional rehabilitation therapy. The electrodes were placed in the relevant cerebral motor response areas, with the anode placed at the primary motor cortex (M1 area) contralateral to the affected knee and the cathode placed at the supraorbital area (SO area) ipsilateral to the affected knee, without actual stimulation current. The experimental group received active transcranial direct current stimulation in addition to the conventional rehabilitation therapy, with the same electrode placement as the control group, a stimulation current of 2 mA and a duration of 20 minutes, three times a week, continuous treatment for 12 times. One day before the start of treatment and one day after the completion of treatment, the whole-body three-dimensional gait and motion analysis system was used to evaluate the walking function (step length, stride length, walking speed, cadence and stance phase percentage) and joint kinematic parameters (range of motion of the hip/knee/ankle joints in the sagittal, horizontal and frontal plane); Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) was used to evaluate the functional status of the knee joint (pain, other symptoms, activities of daily living, sports and recreation functions, and knee joint-related quality of life); the Timed Up and Go Test (TUGT) was used to evaluate the patients' functional mobility; adverse reactions between the two groups were compared. **Results** (1) Walking function: compared with that before treatment, the step length, walking speed and stride length of both groups increased significantly after treatment ($P < 0.05$), and the stance phase percentage decreased significantly ($P < 0.05$). Compared with the control group, the step length and walking speed of the experimental group after treatment were significantly higher ($P < 0.05$). (2) Range of motion of hip, knee and ankle joints: compared with those before treatment, the hip and knee joint flexion angles and sagittal plane range of motion of both groups after treatment increased significantly ($P < 0.05$); the ankle joint adduction angle and hip joint abduction angle decreased significantly ($P < 0.05$); and the ankle joint varus angle was significantly lower ($P < 0.05$). Compared with the control group, the hip joint flexion angle and sagittal plane range of motion of the experimental group were significantly higher after treatment ($P < 0.05$); the knee joint sagittal plane range of motion was significantly higher ($P < 0.05$). (3) KOOS score: compared with those before treatment, the scores of symptoms, pain, daily activities, sports and recreation functions, knee joint-related quality of life and total KOOS score of both groups after treatment increased significantly ($P < 0.05$). Compared with the control group, the scores of symptoms, pain, daily activities, sports and recreation functions, knee joint-related quality of life and total KOOS score of the experimental group after treatment were significantly higher ($P < 0.05$). (4) TUGT: compared with before treatment, the TUGT of both groups after treatment decreased significantly ($P < 0.05$). Compared with the control group, the TUGT of the experimental group after treatment was significantly shorter ($P < 0.05$). (5) Safety: during the treatment period, no adverse reactions related to skin irritation or exercise training were reported in both groups. **Conclusion** Transcranial direct current stimulation combined with rehabilitation therapy can effectively improve the walking function, hip flexion angle, sagittal plane range of motion of hip and knee joints, knee joint functional status and functional mobility of patients with knee osteoarthritis, with high safety and worthy of clinical generalization and application.

KEY WORDS knee osteoarthritis; transcranial direct current stimulation; rehabilitation therapy; gait function; motor function; knee function

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.06010